



## Flow field and load characteristics of the whole MEXICO wind turbine

Xu, Haoran; Yang, Hua; Liu, Chao; Shen, Wenzhong; Hong, Zedong

*Published in:*  
Yingyong Jichu yu Gongcheng Kexue Xuebao

*Link to article, DOI:*  
[10.16058/j.issn.1005-0930.2017.01.006](https://doi.org/10.16058/j.issn.1005-0930.2017.01.006)

*Publication date:*  
2017

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Xu, H., Yang, H., Liu, C., Shen, W., & Hong, Z. (2017). Flow field and load characteristics of the whole MEXICO wind turbine. *Yingyong Jichu yu Gongcheng Kexue Xuebao*, 25(1), 56-64. <https://doi.org/10.16058/j.issn.1005-0930.2017.01.006>

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

文章编号: 1005-0930(2017)01-0056-009 中图分类号: TK83 文献标识码: A  
doi: 10. 16058/j. issn. 1005-0930. 2017. 01. 006

# MEXICO 风力机整机流场与 载荷特性分析

徐浩然<sup>1</sup>, 杨 华<sup>1</sup>, 刘 超<sup>1</sup>, 沈文忠<sup>2</sup>, 洪泽东<sup>1</sup>

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 丹麦技术大学风能系, 丹麦 灵比 2800)

**摘要:** 采用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法对 MEXICO (Model EXperiment In Controlled cOnditions) 风力机模型非偏航工况下的流场和载荷特性进行稳态数值模拟研究. 采用周向平均方法取出计算得到的流速的轴向、径向和切向分量, 并分别将其与试验值进行对比分析, 计算值和试验值吻合较好, 计算结果可靠. 从叶片截面周围流线和叶片表面压力分布两个角度确定了叶片表面流动分离的位置, 随半径增大分离点位置向后缘移动. 对叶轮尾流中涡量分布的分析表明, 3个叶片通道的涡量分布近似对称, 尾流中涡量逐渐衰减. 稳态模拟中塔架对尾流流动影响较小. 此外还分析了叶轮叶片所受的载荷, 得到了载荷沿径向分布规律, 载荷特性可为风力机气弹性能分析提供依据.

**关键词:** 风力机; 流场; 载荷; 数值模拟

目前对风力机进行气动性能研究的方法主要有: 叶素动量法(Blade Element Momentum method, BEM)、风洞试验和 CFD 分析. BEM 法最早由 Glauert 提出<sup>[1]</sup>, 该方法的计算精度依赖于计及旋转效应的三维翼型数据, 而目前三维翼型数据主要是采用各种模型对二维静态翼型数据进行修正得到. 采用风洞试验方法研究风力机的气动性能耗资巨大且无法对全尺度风力机进行试验. 目前国际上对风力机进行详细压力、流场联合测量的大型试验项目有美国的 Phase VI<sup>[2-3]</sup>和欧盟的 MEXICO 试验<sup>[4]</sup>.

相比而言 CFD 方法廉价很多, CFD 方法不仅能获得风力机叶片所受的载荷, 而且可以得到详细的流场数据. 目前国内外很多学者都在致力于提高 CFD 预测精度的研究. CFD 方法可以分为两类, 第一类是不考虑叶片轮廓, 把叶片简化成升力线、升力面的涡方法<sup>[5]</sup>; 第二类方法是沿叶片外形建立网格, 求解叶片的实际绕流. 竺晓程等<sup>[6]</sup>采用升力线方法对风力机不同来流风速下的气动性能进行了预测. 丹麦技术大学(Technical University of Denmark, DTU) Shen 等<sup>[7]</sup>将叶片简化成促动线并联合 Navier-Stokes 方程求解

收稿日期: 2015-06-08; 修订日期: 2016-08-03

基金项目: 科技部中欧政府间国际合作项目(2010DFA64660); 江苏省高校自然科学研究重大项目(13KJA348002); 江苏省高校自然科学基金项目(16KJB480003)

作者简介: 徐浩然(1987—), 男, 讲师. E-mail: ydxuhaoran@163.com

通信作者: 杨 华(1975—), 男, 教授. E-mail: yzdx\_yh@163.com

得到了偏航风力机的气动性能. 然而涡方法以及促动线方法并不能反映叶片表面压力分布细节.

拟采用上述第二类 CFD 方法对 MEXICO 风力机的全流场进行数值模拟研究, 分别将计算得到的流场、载荷与试验数据进行对比, 验证 CFD 的计算精度, 分析流场和载荷分布规律.

## 1 计算模型与方法

### 1.1 计算模型

MEXICO 项目由欧盟第五科研框架计划和荷兰经济事务部代理机构资助, 欧盟多家著名风能研究机构参与的大型科研项目, 项目主要目的是获得详细的风力机模型气动和载荷试验数据, 验证和改进风力机气动计算方法.

MEXICO 风力机模型为上风向三叶片水平轴风力机, 风力机叶轮半径为 2.25m, 叶片根部、中部、尖部分别选用 DU、RISOE、NACA 翼型<sup>[8]</sup>.

建立包含叶片、轮毂、机舱、塔架在内的风力机整机模型, 对整机全流场进行数值模拟. 风力机模型及绝对坐标系如图 1 所示, 绝对坐标系中  $x$  轴垂直于水平面指向上方,  $y$  轴和  $z$  轴正方向由右手定则确定, 坐标系原点位于叶轮旋转中心. 来流和  $z$  轴同向, 背对来流观察叶轮沿顺时针方向旋转, 叶片编号如图 1. 规定叶片 1 竖直指向上方的位置为  $0^\circ$  方位角位置.

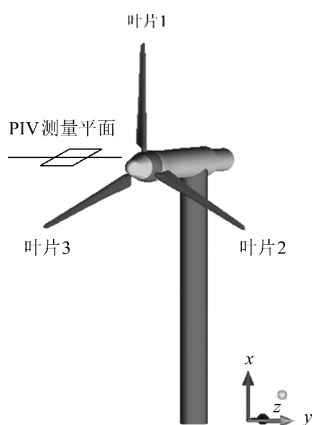


图1 MEXICO 风力机模型和 PIV 片光源位置

Fig. 1 MEXICO wind turbine and the position of PIV laser sheet

### 1.2 计算方法和工况

基于雷诺平均的三维 Navier-Stokes 方程和剪切应力输运 (Shear Stress Transport, SST) 湍流模型对 MEXICO 风力机的流动及载荷特性进行计算.

计算域分为叶轮旋转域和外场域, 根据测试风洞的尺寸确定外场域为一个  $9.5\text{m} \times 9.5\text{m} \times 20\text{m}$  (宽  $\times$  高  $\times$  长) 的长方体区域, 其中旋转域是直径为 4.6m、高为 0.3m 的圆柱域. 旋转域采用六面体网格, 外场域采用四面体网格. 旋转域和外场域采用动静交界面连接. 旋转域附近的外场域网格适当加密. 在外场域的进口给定速度边界条件, 假设来流为

均匀来流,在外场域的出口处给定压力出口边界条件,叶片、轮毂、机舱、塔架以及底板均设置为无滑移固体壁面边界条件。

基于以上方法对 MEXICO 风力机在叶片桨距角为  $-2.3^\circ$  叶轮转速约  $424\text{r/min}$  来流风速  $10$ 、 $15$  和  $24\text{m/s}$  的非偏航工况进行 CFD 数值计算。

## 2 流动特性分析

### 2.1 流速计算值与试验值对比

目前关于 Phase VI 风力机的数值模拟研究<sup>[9-11]</sup>都是对宏观载荷和功率特性以及计算流场进行分析, MEXICO 试验测得了详细的细部流场数据,这些详实的流场数据可以从另一个方面来验证数值计算结果的可靠性,所以将计算得到的 MEXICO 风力机流速和试验值进行比较分析。

MEXICO 试验采用三维粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV) 技术进行流场测量。测量平面位于图 1 所示  $270^\circ$  方位角处,即时钟 9 点处。在  $yoz$  平面上取  $y = -1.8\text{m}$  (如图 2 所示) 位置处的三维试验流速进行分析。

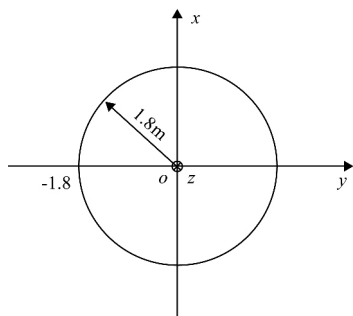


图 2 流速数据坐标系

Fig. 2 Coordinate system of velocity data

因为试验测得的流速是叶片在不同周向位置时的平均值,所以采用周向平均方法对计算数据进行处理,为了和测量范围内  $y = -1.8\text{m}$  处的试验数据比较,具体做法是在  $z = -5 \sim 5\text{m}$  范围内,如图 2 所示半径为  $1.8\text{m}$  的圆柱面上从竖直向上的  $0^\circ$  方位角位置开始每隔  $5^\circ$  取一条平行于  $z$  轴的数据线。然后将不同方位角位置数据线上各数据点的  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向上的速度投影到该位置的径向(叶根指向叶尖为正)、切向(叶轮旋转速度方向为正)和轴向(和  $z$  轴正方向同向为正)方向上。最后对各  $z$  位置上不同周向位置速度的

轴向、径向和切向分量分别进行周向平均即可得计算流速轴向、径向、切向分量的平均值。

图 3 给出了  $10$ 、 $15$  和  $24\text{m/s}$  3 种来流风速下  $yoz$  平面上  $y = -1.8\text{m}$  处速度试验值和计算值的对比情况。从图 3 中可以看出,轴向速度的试验值和计算值沿轴向减小,在测量范围内轴向速度的试验值和计算值都从经过叶轮旋转平面前开始明显减小,经过叶轮旋转平面后继续减小;计算值和试验值吻合较好。轴向速度减小,空气动能转化为叶轮的机械能。

径向速度沿轴向呈先增大后减小的趋势,远离叶轮的上下游处,径向速度较小,叶轮旋转平面前后径向速度较大,在离心力和科氏力的共同作用下气流产生明显的径向流动,且  $y = -1.8\text{m}$  位置处径向速度为正,方向由叶根指向叶尖。在 3 种不同来流风速下径向速度的计算值和试验值吻合较好,变化趋势一致。

切向速度在叶轮旋转平面之前测量值和计算值都近似为零,即在叶轮旋转平面上流动的旋转分量近似为零。由于叶轮旋转作用使叶轮平面后的气流具有了旋转分量,在尾流中切向速度为负,表明尾流旋转方向和叶轮旋转方向相反。

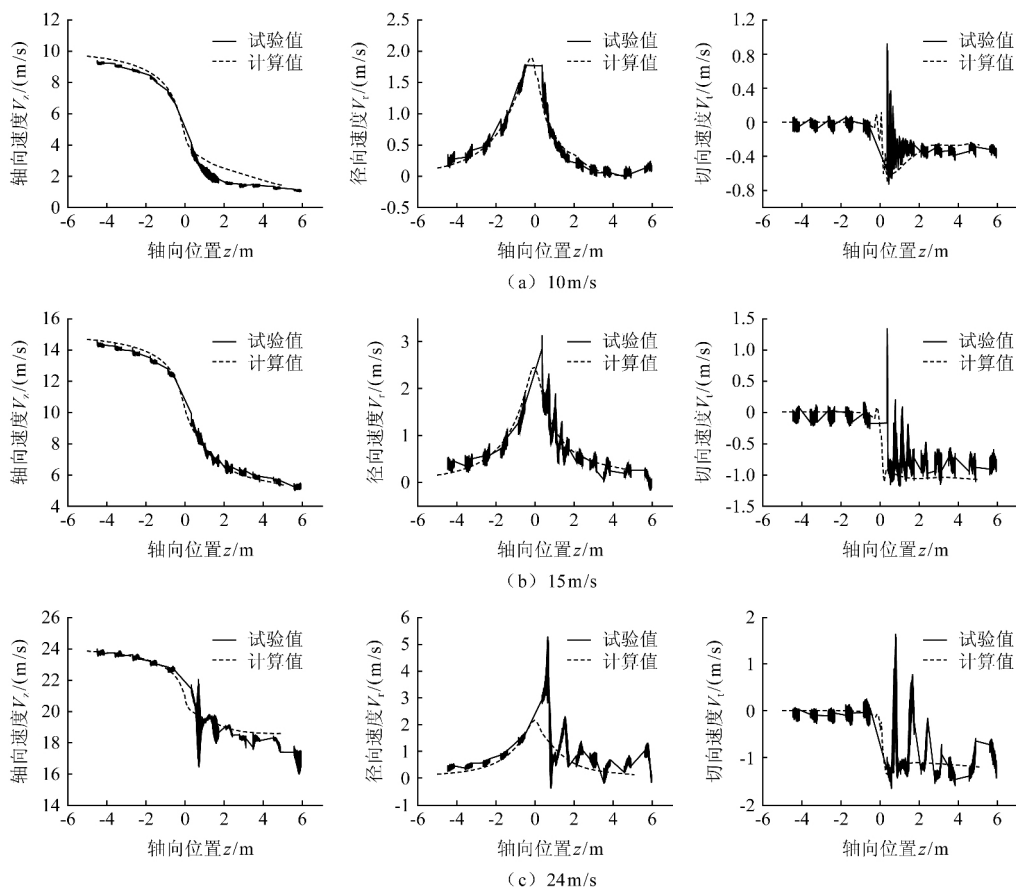


图3 不同风速时  $y = -1.8\text{ m}$  处流速试验值和计算值对比

Fig. 3 Comparison between computational and experimental data of flow past the different MEXICO rotor at the different wind speed and the position of  $y = -1.8\text{ m}$

通过对比发现在3种不同来流风速下轴向速度、径向速度、切向速度的计算值和试验值沿轴向变化趋势一致,三者的计算值和试验值都吻合较好,计算结果可靠。

## 2.2 叶片绕流特性分析

当来流风速为  $10\text{ m/s}$  和  $15\text{ m/s}$  时,叶片表面流动分离区都很小,当来流风速为  $24\text{ m/s}$  时叶片表面分离区较大<sup>[12]</sup>,论文重点分析叶片表面分离区较大来流风速为  $24\text{ m/s}$  时的叶片绕流特性。图4给出了来流风速  $24\text{ m/s}$  时叶片1吸力面表面极限流线以及  $35\% R$ 、 $60\% R$  和  $82\% R$  3处径向截面上的流线图  $R$  为叶轮半径。

风速为  $24\text{ m/s}$  时,流动分离存在于叶片整个吸力面,分离线贯穿整个吸力面,在分离线前缘侧,流动基本为二维流动,而后缘侧有明显的径向流动,流动三维特性明显。此时  $35\% R$ 、 $60\% R$  和  $82\% R$  3个截面都出现流动分离现象,  $35\% R$  截面上的流动从吸力面约  $25\%$  弦长位置处开始发生分离,分离区内存在较大的漩涡,且分离区有些流线并不封闭说明此处存在径向流动,流动三维特性明显。从  $35\% R$  到  $82\% R$  范围内流动分离点逐渐向后缘移动,分离区域收缩。  $24\text{ m/s}$  风速下叶片上述3个截面流动分离点的位置同样可以从

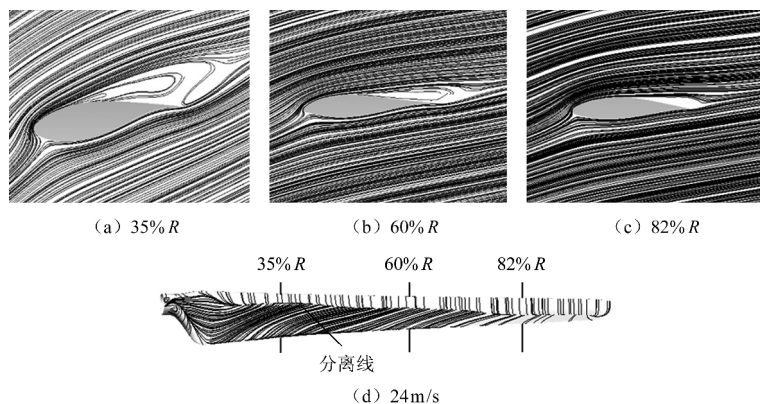


图4 叶片吸力面极限流线及不同径向截面上的流线

Fig. 4 Limiting streamlines on suction side of MEXICO blade and streamlines at different radial profiles

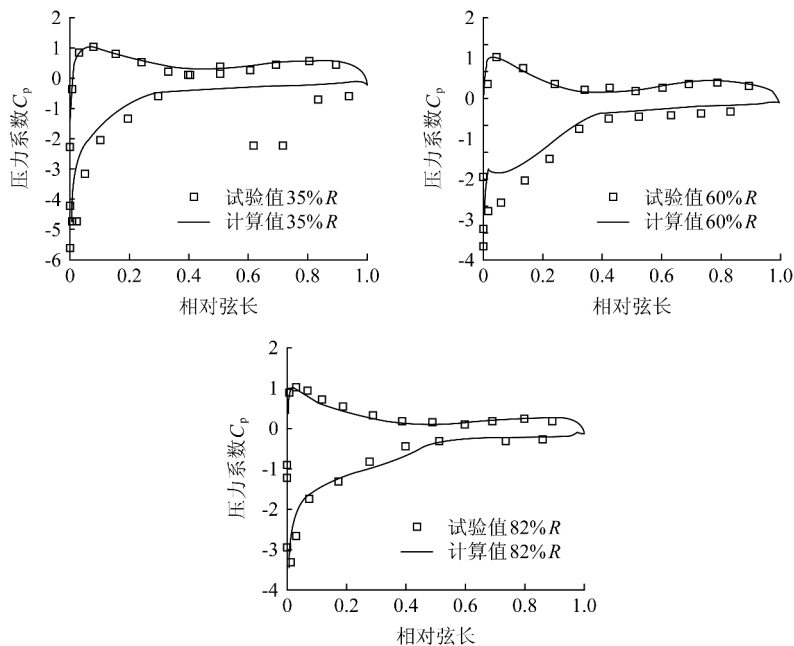


图5 风速 24m/s 时叶片不同截面表面压力系数分布

Fig. 5 The distribution of pressure coefficients on different profiles at a wind speed of 24m/s

图5 给出的 35%  $R$ 、60%  $R$  和 82%  $R$  3 个断面上叶片表面压力系数分布看出,因为在分离区压力基本为常数,压力值近似等于分离点的值,分离区的压力系数分布在图上近似为一水平线。且分离区的压力小于未分离时的压力,这就产生了沿相对来流方向的压力差,形成压差阻力导致整体阻力增加,叶片翼型升阻比下降,叶片气动效率降低。图5 中压力系数试验值和 CFD 计算值吻合较好,且在吸力面两者反映的流动分离位置一致。

### 2.3 叶轮尾流流动特性分析

风力机尾流会对叶片气动性能以及下游风力机的运行产生影响,本文仅对发生明显流动分离的  $24\text{m/s}$  风速下叶轮旋转平面下游的尾流进行分析.从计算结果中提取叶轮下游垂直于转轴平面内的尾流流场数据进行分析.图 6 给出了计算域内垂直于转轴  $z = 0.1R$ 、 $0.2R$ 、 $0.8R$ 、 $1.1R$  和  $2R$  平面内的涡量分布云图.

从图 6 可以看出在叶轮尾流中存在 3 个由涡带围成的扇形区域,一张叶片对应一个扇形区域.3 个叶片通道尾流流动近似对称.在靠近叶轮旋转平面较近的  $z = 0.1R$  和  $z = 0.2R$  平面内,扇形区域内涡量分布较为复杂,存在多种强度的漩涡运动.随着距叶轮旋转平面距离的不断增大,扇形区域内漩涡运动逐渐减弱,只在扇形区域边缘有一连续涡带,随着距叶轮旋转平面距离的进一步增大,围成扇形区域的涡带也逐渐衰减,原先封闭的扇形区域也不再封闭(图 6(e)).

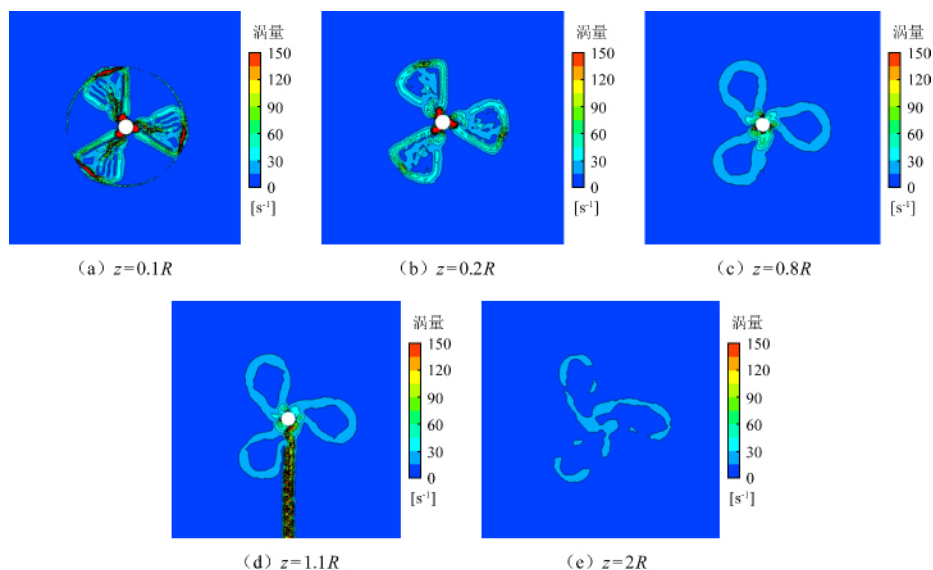


图 6 叶轮尾流区涡量分布

Fig. 6 The distribution of vorticity in the wake

叶根和叶尖部位存在强度相对较大的漩涡,随着距叶轮旋转平面距离的增大,叶尖涡和叶根涡都逐渐衰减. $z = 0.1R$  处叶尖涡区涡量的最大值为  $439/\text{s}$ ,叶根涡区涡量最大值为  $564/\text{s}$ . $z = 0.2R$  处叶尖涡区涡量最大值快速减小为  $71/\text{s}$ ,叶根涡区涡量的最大值衰减为  $321/\text{s}$ . $z = 0.8R$ 、 $z = 1.1R$ 、 $z = 2R$  处叶尖涡区涡量最大值分别为  $18/\text{s}$ 、 $18/\text{s}$  和  $15/\text{s}$ ,叶根涡区涡量最大值分别为  $161/\text{s}$ 、 $94/\text{s}$ 、 $20/\text{s}$ .在距离叶轮旋转平面  $0.1R \sim 2R$  范围内,叶尖涡强度衰减得比叶根涡快.从图 6(d) 可以看到由于塔架的存在,气流在塔架后产生一个较强漩涡区域,而图 6(e) 中塔架的影响已很小,可见塔架对尾流的影响只局限在靠近塔架的小范围区域内.

由此可见,随着距叶轮旋转平面距离的增加,叶轮对流动的影响逐渐减小,尾流中的漩涡强度逐渐衰减,在稳态模拟中塔架对叶轮尾流影响较小.

### 3 载荷特性分析

根据叶片 1 五个测试断面处( 25%  $R$ 、35%  $R$ 、60%  $R$ 、82%  $R$ 、92%  $R$ ) 计算得到的叶片表面压力,求得叶片 1 各测试断面所受轴向力和切向力,并与试验数据对比. 轴向力  $F_n$  和切向力  $F_t$  定义为

$$F_{n_i} = \oint P_{ij} \cdot e_n dl \quad (1)$$

$$F_{t_i} = \oint P_{ij} \cdot e_t dl \quad (2)$$

式中:  $F_{n_i}$  表示第  $i$  个断面所受轴向力;  $F_{t_i}$  表示第  $i$  个断面所受切向力;  $P_{ij}$  表示第  $i$  个断面表面第  $j$  个点的压力;  $e_n$  和  $e_t$  分别表示法向和切向单位向量.

图 7 给出了 10、15 和 24m/s 风速下叶片 1 的 5 个测试断面所受轴向力和切向力的试验值和计算值的对比情况. 叶片所受轴向力和切向力都随来流风速的增加而增加,且叶片所受轴向力从叶根到叶尖逐渐增大,而所受切向力从叶根到叶尖呈递减趋势,但减小幅度不大,切向力整体比轴向力小得多. 在 10 和 15m/s 风速下,轴向力的 CFD 计算值大于试验值,切向力的计算值和试验值吻合较好. 在 24m/s 高风速下由于叶片入流攻角较大,发生流动分离现象,轴向力和切向力的 CFD 计算值在一定范围内小于试验值,切向力的计算值和试验值存在一定偏差.

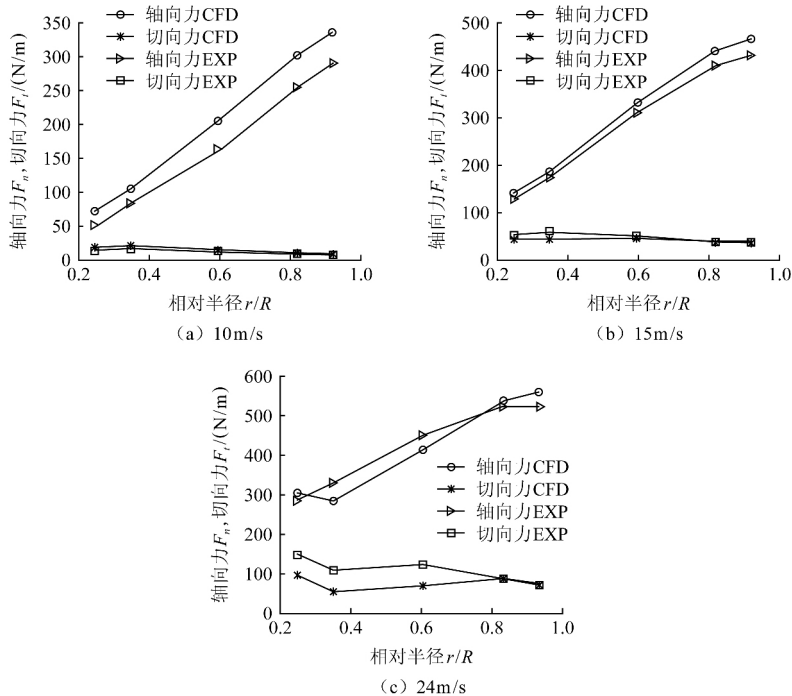


图 7 不同风速时叶片所受轴向力和切向力计算值和试验值比较

Fig. 7 Comparison between computational and experimental data of axial and tangential force at the different wind speeds



## 4 结论

利用 CFD 方法分析 MEXICO 风力机周围流场以及叶片载荷特性, 将计算值和试验值进行对比, 流速和载荷的 CFD 计算值和试验值基本吻合, 计算结果可靠, 通过分析得到以下结论.

(1) 计算得到的流速各分量和试验测得的流速吻合较好. 经过叶轮后轴向速度沿轴向有较大亏损; 径向速度在靠近叶轮平面前后的区域内存在, 远离叶轮平面径向速度较小; 切向速度主要在叶轮下游存在, 且叶轮下游切向速度方向与叶轮旋转方向相反;

(2) 大风速下叶片整个吸力面都发生流动分离, 随半径增大分离点位置向后缘移动, 分离区有明显的径向流动, 流动三维特性明显;

(3) MEXICO 风力机叶轮的 3 个叶片通道尾流中的涡量分布近似对称. 尾流中涡量沿轴向逐渐衰减, 叶尖涡衰减快于叶根涡. 稳态计算时塔架对尾流流动影响较小;

(4) 风力机叶片所受轴向力随半径增大而增大, 切向力则随半径增大而减小. 所得载荷特性可以为风力机气弹性能分析提供依据.

## 参 考 文 献

- [1] Hansen M O L. Aerodynamics of wind turbines[M]. London: Earthscan 2008
- [2] San T, van Kuik G, van Bussel G J W. Estimating the angle of attack from blade pressure measurements on the NREL phase VI rotor using a free-wake vortex model: axial conditions[J]. Wind Energy 2006 9(6): 549-577
- [3] Schepers J G, van Rooij R P J O M. Analysis of aerodynamic measurements on a model wind turbine placed in the NASA-Ames tunnel[R]. Holland: ECN 2008
- [4] Schepers J G, Snel H. Model Experiments in controlled conditions final report[R]. Holland: ECN 2007
- [5] Hansen M O L, Sørensen J N, Voutsinas S, et al. State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity[J]. Progress in Aerospace Sciences 2006 42(4): 285-330
- [6] 竺晓程, 沈昕, 杜朝辉. 带失速延迟模型的改进升力线法预测风力机性能[J]. 太阳能学报, 2007, 28(5): 545-548  
Zhu Xiaocheng, Shen Xin, Du Chaohui. Performance prediction of the HAWT using an improved lifting line method with a stall delay model[J]. Acta Energiae Solaris Sinica 2007 28(5): 545-548
- [7] Shen W Z, Sørensen J N, Yang H. Actuator Line/Navier Stokes computations for flows past the yawed MEXICO rotor[C]. Visby Sweden: Wake Conference 2011
- [8] Yang Hua, Shen Wenzhong, Sørensen J N, et al. Investigation of load prediction on the MEXICO rotor using technique of determination of the angle of attack[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering 2012 25(3): 506-514
- [9] 李宇红, 张庆麟. 风力机叶片三维流动特性与气动性能的数值分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(9): 1172-1176  
Li Yuhong, Zhang Qinglin. Numerical simulation of flow field and aerodynamic performance of a wind turbine blade[J]. Acta Energiae Solaris Sinica 2008 29(9): 1172-1176
- [10] 范忠瑶, 康顺, 王建录. 风力机叶片三维数值计算方法确认研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(3): 279-285  
Fan Zhongyao, Kang Shun, Wang Jianlu. The validation and research on 3D numerical simulation of the aerodynamic performance of wind turbine blades[J]. Acta Energiae Solaris Sinica 2010 31(3): 279-285
- [11] 刘磊, 徐建中. 湍流模型对风力机叶片气动性能预估的影响[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(7): 1136-1139  
Liu Lei, Xu Jianzhong. The effects of turbulence model on the aerodynamic performance prediction of wind turbine blade[J]. Journal of Engineering Thermophysics 2009 30(7): 1136-1139
- [12] 徐浩然, 杨华, 刘超, 等. 不同湍流模型对 MEXICO 风力机气动性能预测精度的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 35(33): 95-101  
Xu Haoran, Yang Hua, Liu Chao, et al. Research on the effect of different turbulence models on the aerodynamic performance prediction accuracy of MEXICO wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE 2013 35(33): 95-101

## Flow Field and Load Characteristics of the Whole MEXICO Wind Turbine

XU Haoran<sup>1</sup>, YANG Hua<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>,  
SHEN Wenzhong<sup>2</sup>, HONG Zedong<sup>1</sup>

( 1. School of Hydraulic Energy and Power Engineering ,Yangzhou University ,Yangzhou 225127 ,China; 2. Department of Wind Energy ,Technical University of Denmark ,Lyngby 2800 ,Denmark)

### Abstract

CFD( Computational Fluid Dynamics) method was used to perform steady numerical simulation investigation on the flow field and load characteristics of MEXICO ( Model EXperiment In Controlled cOnditions ) wind turbine under non-yawed condition. Circumferentially-Averaged method was used to extract the calculated axial ,radial and tangential components of velocity along the axial direction ,then these components were compared with the experimental data ,the compared results show that the computational components agree well with the experimental data and the computational results are reliable. The flow characteristics around the blade was analyzed and the points of flow separation were found along the blade ,the results show that the points of flow separation move towards trailing edge with the increase of radius. The distribution of vorticity in the wake of MEXICO rotor was also analyzed. The distribution of vorticity in the wake of three blade passages is symmetrical approximately. The value of vorticity decreases gradually along the axial direction behind the rotor and the tower has limited effects on the wake when the CFD simulation is steady. Besides , the load distribution along the radial direction of rotor blades was analyzed and the distribution law of load along the blade was obtained. The obtained load characteristic can provide the basis for the analysis of aeroelasticity of wind turbines.

**Keywords:** wind turbines; flow field; load; numerical simulation